

MECANISMOS DE DEFORMACIÓN EN LAMINADOS DE MATRIZ POLIMÉRICA: CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES Y MICROMECAÁNICA COMPUTACIONAL

L. P. Canal¹, J. M. Molina-Aldareguía², C. González^{1,2}, J. Segurado^{1,2}, J. Llorca^{1,2}

¹Departamento de Ciencia de Materiales, ETSI Caminos
Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
c/ Profesor Aranguren s/n, 28040, Madrid, Spain.
E-mail: : luisp@mater.upm.es

²Instituto Madrileño de Estudios Avanzados de Materiales (IMDEA-Materiales).
c/ Profesor Aranguren s/n, 28040, Madrid, Spain.

RESUMEN

Se ha realizado un estudio micromecánico experimental del comportamiento de laminados unidireccionales sometidos a compresión en la dirección perpendicular a las fibras. Se ha empleado la técnica de correlación digital de imágenes para observar la evolución de los campos de desplazamientos y deformaciones en la microestructura del material compuesto. En los contornos de deformación obtenidos experimentalmente se ha comprobado como las fibras tienen una deformación muy pequeña, mientras que las mayores deformaciones se concentran en las zonas de matriz de menor fracción volumétrica de fibras. Simulando por elementos finitos la microestructura estudiada se han reproducido los resultados experimentales, obteniendo distribuciones de campos de desplazamientos y deformaciones muy similares a las observadas experimentalmente.

ABSTRACT

An experimental micromechanical study has been performed to obtain the behavior of unidirectional laminates subjected to transverse compression. The digital image correlation technique was employed to extract the displacement and strain fields developed in the microstructure of the material. The distribution of the strain fields, driven by the different elastic properties between fibers and matrix has been checked. The maximum strains are located in the matrix, meanwhile the fibers remains with a small strain. The real microstructure of the laminate was simulated by the finite element method, the displacement and strain fields obtained from the simulation were very similar to those experimentally observed.

PALABRAS CLAVE: materiales compuestos, correlación digital de imágenes, micromecánica.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el estudio del daño en materiales compuestos es uno de los grandes desafíos de la ciencia de materiales. Mientras que en la mayoría de los materiales homogéneos el fallo se produce por la activación de uno o dos mecanismos, en los materiales compuestos el daño se puede producir por la combinación de muy diversos mecanismos. La aparición de un micromecanismo de daño concreto, o la acción combinada de varios, dependerá tanto de las propiedades mecánicas de las fases que componen el material, como del estado de cargas al que esté sometido.

Para los compuestos de matriz polimérica reforzados unidireccionalmente por fibras largas se distinguen al menos cinco mecanismos de fallo diferentes [1]: la deformación del laminado en tensión en la dirección de

las fibras ocasiona la rotura de las fibras, en compresión en la misma dirección el laminado falla por pandeo de las fibras. La deformación en tensión en la dirección perpendicular a las fibras produce la rotura frágil de la matriz y la decohesión fibra/matriz, mientras en compresión se puede observar un comportamiento más dúctil, formándose de bandas de cortante en la matriz. Finalmente, la delaminación entre las distintas capas que componen el laminado es a menudo otro importante mecanismo de daño a tener en cuenta.

En los últimos treinta años la utilización de laminados de matriz polimérica ha crecido rápidamente, como resultado de sus excelentes propiedades mecánicas específicas y de la aparición de nuevas técnicas de procesado y control de calidad. Además, los ingenieros han desarrollado nuevas estrategias de diseño para tratar con la naturaleza anisótropa de estos materiales. Sin embargo, aún no existe un criterio de fallo para los

laminados fiable en todos los posibles estados de carga, lo que en muchos casos obliga a sobredimensionar las estructuras con laminados.

Habitualmente, el comportamiento mecánico hasta el fallo de los materiales compuestos se obtiene mediante resultados experimentales, sin atender a los distintos micromecanismos que ocasionan el daño. Recientemente se ha popularizado el uso de la micromecánica computacional para el estudio de estos micromecanismos de deformación y daño. Varios trabajos han demostrado que el comportamiento del material se puede obtener de forma fiable mediante simulaciones numéricas de un elemento del volumen de la microestructura del compuesto [2-4]. Sin embargo, para conseguir buenos resultados numéricos resulta crítico incluir en las simulaciones las propiedades realistas de las distintas fases que componen el compuesto y los diferentes micromecanismos de daño que se pueden producir.

En este trabajo se presenta una novedosa técnica experimental para el estudio del comportamiento micromecánico de materiales compuestos. Mediante la adquisición de imágenes de la microestructura del material compuesto y su evolución durante un ensayo mecánico, esta técnica permite visualizar los microcampos de desplazamientos y deformaciones que se producen en el seno del material. Los datos obtenidos experimentalmente posibilitarán un mejor conocimiento del inicio y propagación del daño en materiales compuesto, además permitirán mejorar y validar los modelos numéricos.

Para este estudio, se escogieron laminados unidireccionales. Todos los ensayos se hicieron en la dirección perpendicular a las fibras, ya que debido a las grandes diferencias en las propiedades mecánicas de las dos fases las deformaciones en el plano transversal son muy heterogéneas. Se realizaron ensayos de compresión porque en la dirección perpendicular a las fibras son estables y se llega a una gran deformación sin que aparezca una rotura frágil del material.

2. TÉCNICA EXPERIMENTAL Y MATERIALES

La correlación digital de imágenes (DIC) es una novedosa técnica experimental para la medida de deformaciones. Al no requerir el contacto con las muestras, la técnica es fácilmente aplicable en numerosos ensayos, como los realizados a pequeñas escalas, a altas temperaturas o a impacto. Además, esta técnica no sólo proporciona la deformación media de una región de interés de la muestra, si no que también es capaz de resolver la evolución de los microcampos de desplazamientos y deformación local en la superficie del material ensayado. Esta habilidad la hace muy atractiva para ser aplicada en materiales heterogéneos, en los que las distintas propiedades mecánicas de las fases producirán campos de deformación claramente no

homogéneos.

La técnica de la correlación digital de imágenes fue desarrollada durante los 80 [5,6], y utilizada posteriormente en numerosas aplicaciones, tanto en la investigación como en la industria. Para la aplicación de esta técnica es necesario tomar diversas imágenes de la muestra durante la realización del ensayo, a diferentes niveles de carga. Comparando las imágenes adquiridas, el software de correlación de imágenes (en este trabajo se ha empleado el software comercial VicSNAP, distribuido por Correlated Solutions, Inc.) obtiene los campos de desplazamiento en la superficie de la muestra y a partir de ellos es capaz de obtener los campos de deformaciones. El programa logra seguir los desplazamientos en la superficie de la muestra evaluando el cambio de posición de numerosos grupos de píxeles en base a la escala de grises de la imagen de la muestra deformada. Así, para que el programa pueda distinguir entre los diferentes puntos de la muestra es necesario que su superficie tenga un patrón irregular.

Los ensayos se llevaron a cabo en una micromáquina de tracción-compresión fabricada por Kammrath & Weiss. Está micromáquina está especialmente diseñada para trabajar en el interior del microscopio electrónico de barrido Zeiss Evo MA15. Durante el ensayo se registraron imágenes con 2000 aumentos de la microestructura del material, posibilitando así su posterior correlación. La utilización de esta técnica requiere de imágenes de alta resolución, por lo que su adquisición en el microscopio electrónico de barrido se convierte en un proceso lento, en el que se necesita emplear aproximadamente un minuto por imagen. Este tiempo de adquisición obliga a detener el ensayo de compresión a una determinada carga, esperar unos minutos para que se produzca la relajación del material, y tomar la imagen. A continuación, se vuelve a incrementar la carga hasta el siguiente punto de adquisición de imágenes.

El material ensayado en este trabajo se preparó a partir de pre-impregnados unidireccionales de fibra de vidrio con resina epoxy, concretamente E-glass/MTM 57 de Advanced Composite Group (UK). Con estos pre-impregnados se prepararon paneles de 350 x 300 mm² que se calentaron a una velocidad de 3°C/min y consolidaron en autoclave durante 30 minutos a 120° C y 0.64 MPa de presión. Después fueron enfriados al mismo ritmo de 3°C/min y se suprimió la presión al llegar a los 80° C. La configuración final de los laminados fabricados fue [0]₁₄ y la fracción volumétrica de fibras nominal fue del 54%. Los paneles se inspeccionaron tras su procesado para asegurarse que estaban libres de delaminaciones y otros defectos.

De estos paneles se cortaron las muestras en forma de prismas rectangulares para los ensayos de compresión en la dirección transversal a las fibras, las dimensiones finales de las muestras fueron de 2.5 x 2 mm y 1.6 mm de espesor. Para poder observar la microestructura del material en el microscopio electrónico, una de las caras

fue pulida con papel de carburo de silicio (SiC) hasta la lija de 1000 y terminada con soluciones de polvo de diamante hasta 1 μm . El patrón irregular, necesario para aplicar la técnica de correlación de imágenes, se consiguió dispersando sobre la superficie de la muestra partículas de alúmina (Al_2O_3) de 0.5 μm de tamaño medio. Para dispersar las partículas de forma homogénea se realizó una suspensión del 1% en propanol, utilizando yodo (I_2) como agente dispersante. Esta suspensión de partículas se aplicó sobre las muestras ya pulidas, metalizándolas a continuación con Au-Pd, para observarlas en el microscopio electrónico de barrido. En la figura 1 mostramos una de las imágenes adquiridas de las muestras ensayadas. La región de interés en la que se realizó la correlación digital de imágenes aparece dentro del recuadro blanco.

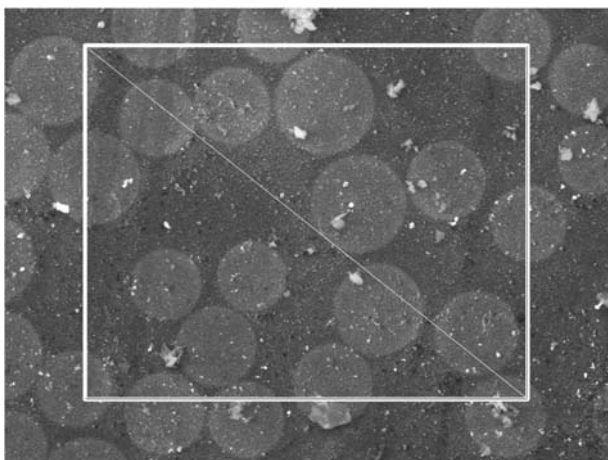


Figura 1. Micrografía de una de las muestras ensayadas y región de interés estudiada. Sobre la superficie se aprecia la dispersión de partículas de alúmina realizada para aplicar la correlación digital de imágenes. La línea que cruza la región de interés representa el camino utilizado posteriormente para representar gráficamente los desplazamientos y deformaciones obtenidos.

3. MODELO NUMÉRICO

La validación numérica de los resultados experimentales se realizó mediante simulaciones por el método de elementos finitos de la microestructura de la región de interés estudiada experimentalmente. Para poder comparar de forma directa la solución numérica con los microcampos de desplazamientos y deformaciones obtenidos utilizando la correlación digital de imágenes, fue necesario generar exactamente la misma microestructura. Para ello, a partir de la imagen del material descargado, se obtuvo el diámetro y la posición inicial de las fibras que componen la región de interés. Con estos datos se pudo reproducir la geometría de la microestructura real del material ensayado. El modelo fue discretizado con elementos

cuadráticos de deformación plana (CPE6 y CPE8 en Abaqus [7]). El tamaño de elemento empleado fue suficientemente pequeño para captar los fuertes gradientes en los campos de deformación que se producen en los ligamentos entre fibras. El mallado se realizó utilizando un algoritmo de generación automático disponible en Abaqus CAE. Al final del proceso se obtuvo la malla de elementos finitos mostrada en la figura 2, compuesta aproximadamente por 20000 elementos y 60000 nodos. Los cálculos se realizaron con Abaqus V6.8, en régimen de pequeñas deformaciones.

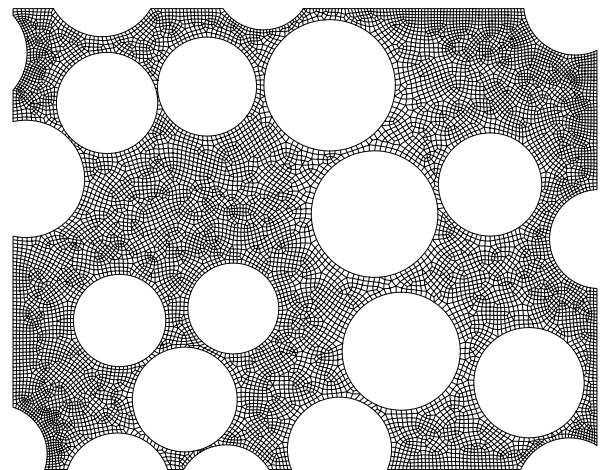


Figura 2. Discretización por elementos finitos de la región de interés estudiada. Las fibras han sido suprimidas para poder observar su posición.

Aunque en la compresión del laminado en la dirección transversal a las fibras aparecen efectos no lineales como la plastificación de la matriz y las decohesiones fibra-matriz, en una primera aproximación no han sido considerados en el modelo numérico, pues el objetivo es reproducir la deformación del laminado para pequeñas cargas, cuando aún todo el material se encuentra en la región elástica. Así, tanto las fibras como la matriz se modelizaron como sólidos lineales, elásticos e isotrópicos. No se incluyeron elementos cohesivos en las intercaras fibra-matriz, puesto que tampoco se trató de modelizar la decohesión. En la tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas utilizadas para modelizar las dos fases del laminado, estas propiedades fueron recopiladas de anteriores trabajos realizados con este material [8].

Tabla 1. Propiedades elásticas de la matriz y las fibras.

	E (GPa)	ν
Fibra de vidrio	74	0.2
Matriz epoxy	3.35	0.35

Para completar el modelo numérico es necesario incluir de forma realista las condiciones de contorno que la compresión del laminado genera en la región de interés estudiada. Esto se consiguió partir de los datos de desplazamientos obtenidos experimentalmente con la correlación digital de imágenes. Mediante un script realizado en MATLAB se impusieron los desplazamientos de cada nodo del contorno del modelo numérico.

4. RESULTADOS

Los contornos de desplazamientos en la dirección de aplicación de la carga, obtenidos con la técnica de correlación de imágenes, se muestran en la figura 3. De estos contornos se podría considerar que la variación de los desplazamientos en el material compuesto se produce de una forma bastante homogénea en toda la región de interés estudiada. Sin embargo, cuando se derivan los campos de desplazamientos para obtener las deformaciones (figura 4) se comprueba que el material se ha deformado de una manera muy heterogénea. Se aprecian claramente mínimos de deformación que se concentran en los lugares ocupados por las fibras, mientras que las máximas deformaciones aparecen en la matriz, en las zonas donde la fracción volumétrica local de fibras es menor. Estos contornos de deformación son fácilmente explicables debido al contraste elástico entre las dos fases que componen el laminado.



Figura 3. Contornos de desplazamientos en la dirección de aplicación de la carga, obtenidos experimentalmente mediante la técnica de correlación digital de imágenes.

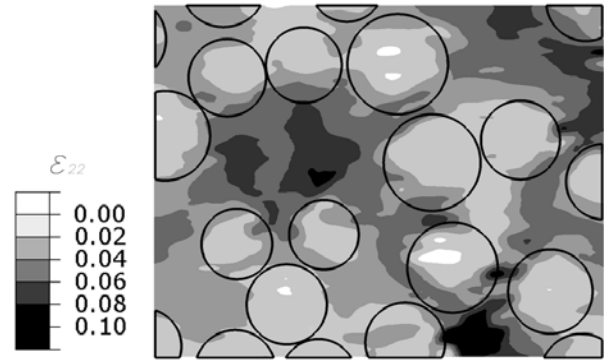


Figura 4. Contornos de deformación en la dirección de aplicación de la carga, obtenidos experimentalmente mediante la técnica de correlación digital de imágenes. La deformación de compresión se ha representado con signo positivo.

En la figura 5 se muestran los contornos de desplazamientos en la dirección vertical obtenidos de las simulaciones por elementos finitos. Al compararlos con los contornos de desplazamientos experimentales (figura 3), se puede observar un extraordinario parecido entre los resultados numéricos y los experimentales. Se comprueba como la forma y la magnitud de los de los contornos de desplazamientos coinciden con gran exactitud.



Figura 5. Contornos de desplazamientos en la dirección de aplicación de la carga, obtenidos mediante simulaciones por elementos finitos.

La comparación de los contornos de deformación obtenidos de las simulaciones con los experimentales resulta más compleja. El método de elementos finitos es capaz de recoger los grandes gradientes que se forman entre las fibras y la matriz, mientras que la correlación digital de imágenes obtiene la deformación mediante el gradiente numérico de los campos de desplazamientos, lo que produce un cierto suavizado de los mismos. A pesar de estas diferencias, que afectan principalmente al

valor de los campos en las intercaras fibra-matriz, se puede observar una gran similitud entre los contornos de deformación, en la dirección de aplicación de la carga, experimentales (figura 4) y los obtenidos de las simulaciones por elementos finitos (figura 6).

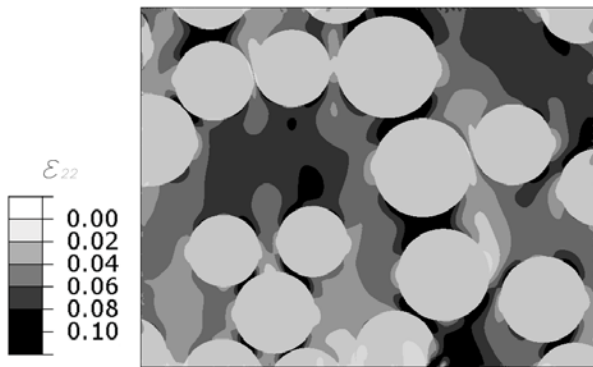


Figura 6. Contornos de deformación en la dirección de aplicación de la carga, obtenidos mediante simulaciones por elementos finitos. La deformación de compresión se ha representado con signo positivo.

Al ser el módulo elástico de las fibras mucho mayor que el de la matriz, la deformación en la dirección de aplicación de la carga (ϵ_{22}) es mucho más grande en la matriz, quedando las fibras prácticamente sin deformación. Este efecto se puede observar claramente en los contornos de deformación obtenidos mediante las simulaciones numéricas, donde se aprecia que las fibras tienen una deformación homogénea y casi nula, mientras que la práctica totalidad de la deformación es absorbida por la matriz. En los contornos de deformación obtenidos experimentalmente también se puede apreciar este fenómeno. Sin embargo, experimentalmente la correlación digital de imágenes no consigue resolver de una forma tan clara el gradiente de deformaciones que se produce en la interfase fibra-matriz, si no que las deformaciones aparecen suavizadas, con un mínimo de deformación casi nula situado aproximadamente en el centro de la sección transversal de la fibra.

En el contorno de deformación ϵ_{22} obtenido de las simulaciones también se observa que las máximas deformaciones de la matriz se concentran en zonas entre las fibras orientadas en forma de columna según la dirección de aplicación de la carga. La observación de estos ligamentos es de gran importancia, pues será aquí donde se inicien los micromecanismos de fallo del material. Este efecto no puede apreciarse de una forma clara en los contornos de deformación experimentales, ya que los puntos de máxima deformación son muy pequeños, lo que produce que el programa de correlación digital de imágenes los difumine entre las deformaciones casi nulas de las fibras. Así, para conseguir captar experimentalmente esta concentración

de deformaciones se necesitaría tomar imágenes a más aumentos en las zonas donde estas se producirán.

En la figura 7 se representan los desplazamientos en la dirección de aplicación de la carga a lo largo del camino señalado en la figura 1. Se puede comprobar como las gráficas de los desplazamientos experimentales tienen una gran similitud con los obtenidos por simulación. Aunque los desplazamientos experimentales sean un poco más suaves, la posición de todos los máximos y mínimos de desplazamientos coincide por completo.

Las deformaciones en la dirección de aplicación de la carga a lo largo del camino señalado en la figura 1 se recogen en la figura 8. Los máximos de deformaciones localizados en los ligamentos entre las fibras, aparecen en la gráfica obtenida mediante simulaciones como picos muy pronunciados. Aunque experimentalmente sí se aprecia la posición de estos picos, el suavizado que realiza la técnica de correlación digital de imágenes impide obtener los valores de estos picos de máxima deformación. También se comprueba cómo las zonas y los valores de deformación mínima obtenidos experimentalmente, así como los valores medios de deformación a lo largo de todo el camino, son muy similares a los resultados obtenidos de las simulaciones.

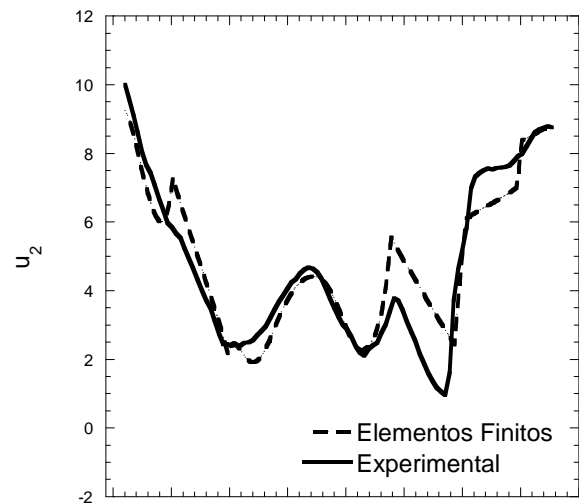


Figura 7. Desplazamientos en la dirección de aplicación de la carga a lo largo del camino señalado en la figura 1.

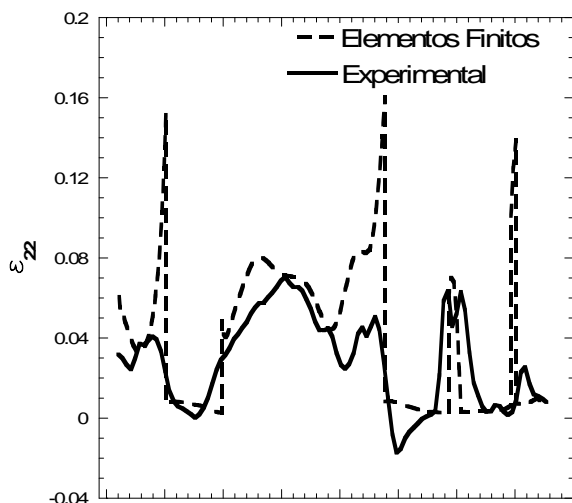


Figura 8. Deformaciones en la dirección de aplicación de la carga a lo largo del camino señalado en la figura 1.

5. CONCLUSIONES

La gran diferencia entre las propiedades mecánicas de las dos fases que componen el material compuesto provoca la aparición de microcampos de deformación muy heterogéneos. La observación de estos microcampos de deformación es de gran importancia, pues determinarán el comienzo del fallo del material. En este trabajo se ha presentado una novedosa técnica experimental para el estudio micromecánico de materiales compuestos. Además, los resultados de esta técnica experimental han sido reproducidos mediante simulaciones micromecánicas por elementos finitos.

Durante la fase experimental se ensayó el laminado unidireccional en compresión en la dirección perpendicular. Estos ensayos se realizaron en el interior de un microscopio electrónico de barrido, lo que permitió adquirir imágenes durante el ensayo de la microestructura del material a distintos niveles de carga. Las imágenes tomadas durante el ensayo posibilitaron la posterior aplicación de la técnica de correlación digital de imágenes. Con esta técnica se pudo comprobar experimentalmente la formación de los microcampos de deformación muy heterogéneos en el seno del material.

Para validar la técnica experimental se realizaron simulaciones micromecánicas de la región de interés estudiada experimentalmente. Se pudo comprobar una gran similitud entre los campos de deformaciones observados experimentalmente y los obtenidos de las simulaciones numéricas, probando así el buen funcionamiento de la técnica experimental.

Se ha comprobado que la correlación digital de imágenes es muy adecuada para realizar estudios micromecánicos en materiales compuestos y como esta

técnica podrá ser de gran utilidad para posteriores estudios sobre la formación y propagación del daño en este tipo de materiales.

REFERENCIAS

- [1] Hinton, M.J., Soden, P.D., Kaddour, A.S. *Failure criteria in fiber-reinforced polymer composites: the World Wide Failure exercise*. Elsevier, 2004.
- [2] Cox, B., Yang, Q. *In quest of virtual tests for structural composites*. Science 314, 1102–1107, 2006.
- [3] LLorca, J., Segurado, J. *Three-dimensional multiparticle cell simulations of deformation and damage in sphere-reinforced composites*. Materials Science and Engineering A365, 267–274, 2004.
- [4] Segurado, J., LLorca, J. *Computational micromechanics of composites: the effect of particle spatial distribution*. Mechanics of Materials 38, 873–883, 2006.
- [5] Chu, T.C., Ranson, W.F., Sutton, M.A., Peters, W.H. *Applications of digital image correlation technique to experimental mechanics*. Experimental Mechanics 25, 232–244. 1985.
- [6] Bruck, H.A., McNeill, S.R., Sutton, M.A., and Peters, W.H. *Digital image correlation using Newton–Raphson method of partial differential correction*. Experimental Mechanics 29, 261–267, 1989.
- [7] Abaqus Users' manual, version 6.8. ABAQUS, Inc. 2008.
- [8] Totry, E., González, C., LLorca, J., Molina-Aldareguía, J. M. *Mechanisms of shear deformation in fiber-reinforced polymers: experiments and simulations*. International Journal of Fracture 158, 197–209, 2009.